АНАЛИЗ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

В.Епифанов, В.Мораренко, Keysight Technologies

В высокоскоростной передаче оптических сигналов, например системах DWDM, появляются побочные шумы, от которых сигнал может быть "очищен" только конвертированием оптического сигнала к электрическому виду и обратно. Существует вероятность появления и битовых ошибок, и накопления джиттера, приводящие к потери синхронизации. Таким образом, предложен стробоскопический осциллограф для точных измерений характеристик цифровых устройств, в том числе, оптических приемопередатчиков, предназначенных для передачи данных со скоростью от 50 Мбит/с до 80 Гбит/с и более и измерительная система на его основе.

Учитывая динамичный рост потребностей в передаче информации, возрастание требований по качеству передачи, требований защищенности и управляемости соединений, МСЭ-Т (сектор стандартизации международного союза электросвязи) разрабатывает и совершенствует стандарты на передачу информации в оптических системах. Одним из основных направлений деятельности МСЭ-Т стало принятие концепции построения транспортных сетей, опубликованной в виде рекомендации G.805, и разработки моделей транспортных сетей, базирующихся на волоконно-оптических и радиорелейных системах передачи. При этом основная роль отводится, конечно, волоконно-оптическим системам. Стробоскопический осциллограф Keysight DCA-X 86100D позволяет проводить точные измерения характеристик цифровых устройств со скоростью передачи данных от 50 Мбит/с до 80 Гбит/с и более.

Типовые приложения такого осциллографа включают в себя:

- измерение характеристик оптических сигналов при разработке и производстве приемопередатчиков;
- измерение характеристик электрических сигналов при разработке и тестировании специализированных интегральных схем и ПЛИС;

ANALYSIS OF HIGH-SPEED OPTICAL SIGNALS USING SAMPLING OSCILLOSCOPE

V.Epifanov, V.Morarenco, Keysight Technologies

In high-speed optical signal transmission, e.g., in DWDM systems, an additional noise appears which can be removed from the signal only by converting the optical signal into an electrical one and vice versa, or a risk of bit errors arises, or the accumulation of jitter causes a loss of synchronization. Thus, a sampling oscilloscope for accurate characterization of digital devices, including optical transceivers for transmitting data at a rate of 50 Mbit/s to 80 Gbit/s or more, and the measuring system on its basis were proposed.

In view of the dynamic growth in demand for information transfer, increasing requirements for the quality of transfer, security, and connections control, ITU-T (International Telecommunication Union) develops and improves standards for information transmission in optical systems. One of the main activities of ITU-T is the adoption of the concept of transport network building, published in the form of Recommendation G.805, and transport network modeling development based on fiber-optic and radio-relay transmission systems. At the same time fiber-optic systems, of course, have to play the main role.

Keysight DCA-X 86100D sampling oscilloscope allows to perform accurate characterization measurements of digital devices with a data rate of 50 Mbit/s to 80 Gbit/s or more.

Typical applications of this oscilloscope include:

- characterization of optical signals when designing and manufacturing transceivers;
- characterization of electrical signals when developing and testing ASICs and FPGAs;
- measurement of reflection and transmission parameters in the time domain and S-parameters when developing serial buses and cables, and characterization of PCBs.

The design of Keysight 86100D DCA-X oscilloscope (Fig.1) provides a successful combination of performances. An analogue wide bandwidth, a small value of jitter inserted in the signal and a low noise

- измерение параметров отражения и передачи во временной области и S-параметров при разработке последовательных шин, кабелей и определение характеристик печатных плат.

В конструкции осциллографа Keysight 86100D DCA-X (рис.1) найдено удачное сочетание рабочих характеристик. Широкая аналоговая полоса пропускания, малое значение вносимого в сигнал джиттера и низкий уровень собственных шумов позволяют проводить точные измерения характеристик оптических и электрических устройств со скоростью передачи данных от 50 Мбит/с до 80 Гбит/с. Базовый блок обеспечивает основу для глубокого анализа разработки, включая функцию компенсации эффектов воздействия кабелей и тестовых приспособлений, что позволяет повысить точность измерений и дает возможность определить реальные характеристики разрабатываемых устройств.

Модульная конструкция позволяет наращивать возможности системы по мере необходимости. Осциллограф DCA-X поддерживает широкий набор модулей для тестирования оптических и электрических устройств. Можно выбрать подходящий модуль, обеспечивающий нужное значение полосы пропускания, фильтрацию и чувствительность. С базовым блоком DCA-X могут использоваться любые модули семейства DCA, при этом обеспечивается 100%-ная обратная совместимость с базовым блоком 86100C предыдущего поколения.

Система имеет типовые конфигурации (рис.2). Для удобства эксплуатации в осциллографе Keysight DCA-X 86100D имеются два пользовательских интерфейса. Один – классический интерфейс анализатора сигналов цифровой связи (DCA) для обеспечения полной обратной совместимости с ранее выпускавшимися моделями базовых блоков. Другой – новый интерфейс FlexDCA, который обеспечивает дополнительные измерительные функции и расширенные возможности анализа сигналов.

Используя различные сочетания базового блока и модулей, разработчики цифровых устройств могут получить четыре инструмента с лучшими в отрасли характеристиками:

- **полнофункциональный осциллограф** с полосой пропускания до 80 ГГц, обеспечивающий точное измерение параметров сигнала;
- **анализатор сигналов цифровой связи** с функцией автоматического анализа глазковой диаграммы при проведении испытаний на соответствие требованиям стандартов;
- **самый точный в отрасли анализатор джиттера** и помех, обеспечивающий одноклавишные измерения субкомпонентов источников джиттера;

Рис.1. *Осциллограф Keysight 86100D DCA-X и его модули*
Fig. 1. *Outside view of Keysight 86100D DCA-X oscilloscope and its modules*

level allow for accurate measurement of optical and electrical characteristics of devices with a data rate of 50 Mbit/s to 80 Gbit/s. The mainframe provides a basis for an in-depth design analysis, including the compensation function for the cables and test fixtures effects that improves measuring accuracy and provides an opportunity to determine the actual characteristics of the developed devices.

The modular design allows increasing the capabilities of the system if needed. DCA-X oscilloscope supports a wide range of modules for testing optical and electrical devices. It is possible to select an appropriate module, which provides the desired bandwidth value, filtering and sensitivity. Any module of DCA family can be used with DCA-X mainframe, besides that 100% backward compatibility with the previous 86100C mainframe is provided.

The system has typical configurations (Fig. 2). For ease of use, Keysight DCA-X 86100D oscilloscope has two user interfaces. One is a classic interface of the digital communications analyzer (DCA) to ensure full backward compatibility with previously released mainframe models. Another one is the new FlexDCA interface, which provides additional measurement functions and advanced signal analysis.

Using various combinations of the mainframe and modules, developers of digital devices can get four instruments with industry-leading features:

- **a full-function oscilloscope** with a bandwidth up to 80 GHz, ensuring accurate signal measurements;
- **a digital communications analyzer** with automated eye diagram analysis for standard compliance testing;
- **the industry's most accurate jitter and interference analyzer**, providing single-button measurements of jitter subcomponents sources;
- **a full-function time domain reflectometer** for high precision impedance and S-parameter analysis.

With the help of the toolbar and drop-down menu, you can perform different types of measurements, and specific types of measurements depend on the

- **полнофункциональный рефлектометр** во временной области для высокоточного анализа импеданса и S-параметров.

С помощью панели инструментов и выпадающих меню можно выполнить различные виды измерений, причем конкретные виды измерений зависят от режима работы DCA-X. Состав демонстрационной измерительной системы для анализа высокоскоростных оптических сигналов представлен на рисунке 3. В качестве источника сигнала в данной измерительной системе используется блок генератора цифровых последовательностей тестера коэффициента битовых ошибок (BERT) Keysight N4960A. Параметры сигнала: частота синтезатора тактового сигнала – 5 ГГц (таким образом, скорость сигнала составляет 10 Гбит/с), амплитуда сигнала 0,5 В.Тип последовательности сигнала – псевдослучайная (PRBS). Длина последовательности – 127 символов.

Электрооптический преобразователь Keysight 81490A (опорный передатчик), находящийся в измерительной оптической системе, настроен на длину

mode of DCA-X. The components of the demonstration measuring system for high-speed optical signal analysis are shown in Figure 3. In this measuring system, the digital-pattern generator of Keysight N4960A bit error rate tester (BERT) is used as a signal source. Signal parameters: frequency of the clock synthesizer is 5 GHz (thus, signal rate is 10 Gbit/s), signal amplitude is 0.5V. The type of signal sequence is pseudorandom (PRBS). Sequence length is 127 characters.

Keysight 81490A electro-optical converter (reference transmitter) located in the measuring optical system is set to a converted optical signal wavelength of 1305.3 nm. The sampling oscilloscope mainframe includes two modules: 83496B clock recovery module and 86105C measuring module with two channels, one optical and one electrical. It should be noted that the bandwidths of the optical and electrical channels are 9 and 20 GHz respectively.

In Scope Mode (when **Scope** key is highlighted on the front panel or **Oscilloscope** caption in a green oval is displayed in the upper left corner of the screen), the

Базовый блок Keysight Infiniium DCA-X 86100D

Аппаратные опции 86100D	Программные опции 86100D (выбрать любую)
Опции запуска (выбрать только одну) STR – стандартные возможности, используется только для базовых измерений глазковых диаграмм ETR – расширенные возможности, используется при измерениях последовательностей сигналов и анализе джиттера **Опции дистанционного управления (выбрать только одну)** GPI – установлена интерфейсная карта GPIB GPN – без интерфейсной карты GPIB	061/062 – пакет программного обеспечения MATLAB 200 – расширенные возможности по анализу джиттера 201 – расширенные возможности по анализу сигналов 202 – расширенные возможности по измерению импеданса и S-параметров 300 – расширенные возможности по анализу амплитудных параметров, шума Q-Scale SIM – программа InfiniiSim-DCA для внедрения предыскажений и их коррекции 86100DU-400 – программа анализа систем фазовой автоподстройки частоты и джиттера спектра 86100DU-401 – расширенные возможности по анализу глазковых диаграмм (джиттер на последовательности PRBS31)

Сменные модули DCA (для типовых приложений*)

Электрический/ /ФАПЧ	**Электрический/ /ФАПЧ**	**Электрический**	**Оптический**	**Оптический**	**Модуль рефлектометра**
от 1 до 12 Гбит/с 86112A Два канала Полоса пропускания более 20 ГГц каждого 83496B Восстановление тактового сигнала (опции -100, -200, -300)	от 1 до 14.2 Гбит/с (высокопроизводительный) 86108A Две выносные головки, полоса пропускания более 32 ГГц каждая с встроенным прецизионным опорным генератором и схемой восстановления тактовой частоты	20, 40 Гбит/с (высокопроизводительный) 86118A Две выносные головки, полоса пропускания более 70 ГГц каждая 86107A встроенный прецизионный опорный генератор (опция -040)	от 1 до 12 Гбит/с 86105C 9 ГГц оптический канал 20 ГГц электрический канал 86107A встроенный прецизионный опорный генератор (опция -040)	20, 40 Гбит/с 86116C 65 ГГц оптический канал 80 ГГц электрический канал 86107A встроенный прецизионный опорный генератор (опция -040)	54754A Дифференциальный Два канала по 18 ГГц Примечание: может также работать как 18 ГГц двухканальный приемник электрических сигналов

Рис.2. *Типовые конфигурации измерительной системы на базе осциллографа Keysight 86100D DCA-X.*
** Для получения консультации по конфигурации системы для конкретного приложения обратитесь в представительство компании Keysight*
Fig. 2. *Typical configurations of the measuring system based on Keysight 86100D DCA-X oscilloscope.*
** For advice on the system configuration for a specific application, contact the representative office of Keysight*

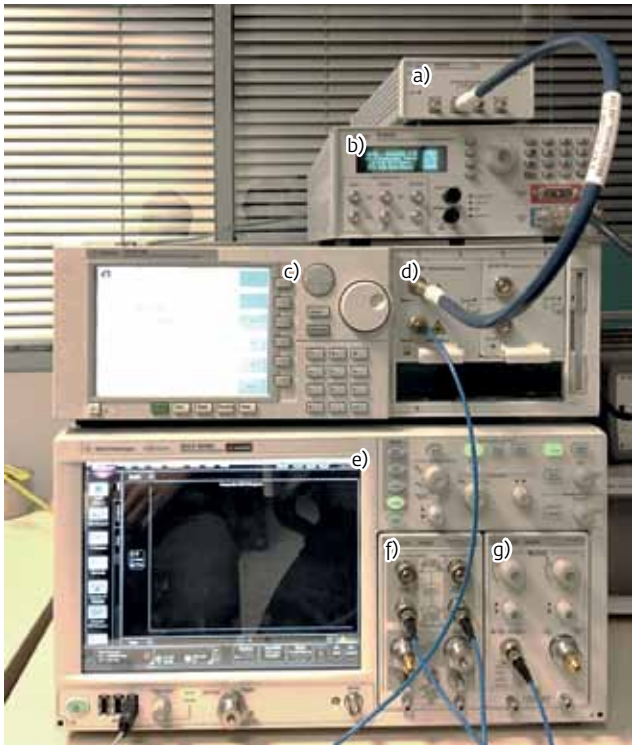


Рис.3. *Состав измерительной системы: a – блок генератора последовательностей BERT N4951B, b – контроллер и синтезатор тактовой сигнала N4960A системы BERT, c – базовый блок измерительной оптической системы 8164B, d – модуль опорного передатчика 81490A, e – базовый блок стробоскопического осциллографа DCA-X 86100D, f – Модуль восстановления тактового сигнала 83496B, g – Измерительный модуль 86105C с оптическим и электрическим каналами*
Fig. 3. *Measuring system components*

волны преобразованного оптического сигнала – 1305,3 нм. В базовый блок стробоскопического осциллографа помещены два модуля: модуль восстановления тактового сигнала 83496B и модуль измерительный с оптическим и электрическим каналами 86105C. Заметим, что полоса пропускания соответственно оптического и электрического канала равна 9 и 20 ГГц.

Находясь в режиме осциллографа (тогда на передней панели подсвечена кнопка **Scope** или в левом верхнем углу экрана отображена надпись **Oscilloscope** в зеленом овале), на экране получают отображение сигнала. Так как система запуска не настроена, на экране осциллографа изначально вы не можете наблюдать четкую цифровую последовательность (рис.4).

Теперь настроим систему восстановления тактового сигнала. Для этого воспользуемся модулем восстановления тактового сигнала 83496B, который

signal is displayed on the screen. Since the triggering system is not set up, initially you cannot observe a clear digital sequence on the oscilloscope screen (Fig.4).

Now, adjust the clock recovery system. For this, use 83496B clock recovery module, which is capable to restore a clock pulse sequence of electrical or optical signals. Further, this module sends a recovered signal to the triggering system, and a residual (70%) signal to the output channel of 86105C measuring module. In this case, the synchronization system will operate a clock-data-recovery (CDR Mode) (Fig. 5). When the clock recovery module is not used, then a trigger signal shall be separately sent to the front panel. Moreover, the value of its frequency shall be devisable by the frequency of the signal.

Now the conditions for the measurement and analysis of the optical signal are created. It should be remembered that the oscilloscope also offers several other modes of operation: jitter analysis, eye diagram. Let us analyze the eye diagram of the tested digital signal. To do this, go into **Eye Mask Mode** by pressing the button on the front panel or by clicking the color button in the upper left corner and selecting **Eye/Mask Mode**.

In the eye diagram mode (Fig. 6), the user is provided an opportunity to determine extinction ratio, average power of the signal, rise time and fall time, total jitter and other characteristics.

Let us now analyze jitter in the digital signal tested. To do this, go into **Jitter Mode** by pressing the button on the front panel or you can select **Jitter/Noise** with one mouse click on the colored button in the upper left

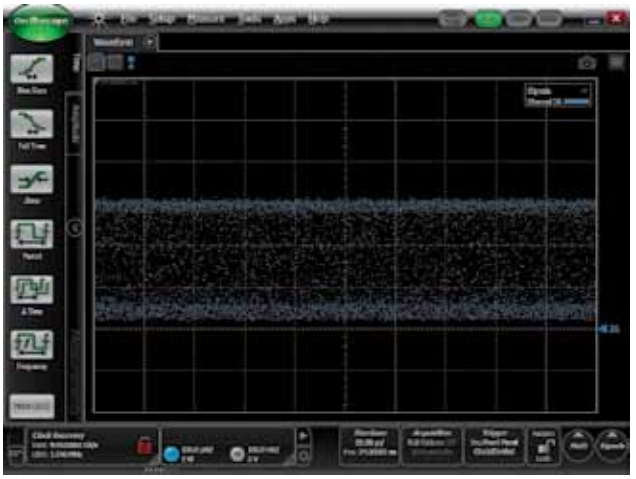


Рис.4. *Сигнал не синхронизирован с сигналом запуска*
Fig. 4. *The signal is not synchronized with the triggering signal*

способен из электрического или оптического сигнала восстановить тактовую последовательность импульсов. Далее этот модуль подает восстановленный сигнал на систему запуска, а оставшийся (70%) сигнал – на выходной канал измерительного модуля 86105C. Система синхронизации в данном случае будет работать по восстановленному тактовому сигналу цифровой последовательности (режим CDR) (рис.5). Когда модуль восстановления тактового сигнала не используется, тогда, отдельно, на переднюю панель необходимо подавать сигнал запуска. Причем значение его частоты должно быть кратным частоте оптического сигнала.

Рис.5. *Сигнал синхронизирован с восстановленным тактовым сигналом*
Fig. 5. *The signal is synchronized with the recovered clock signal*

Теперь созданы условия для проведения измерения и анализа оптического сигнала. Надо учесть, что в осциллографе предусмотрены несколько других режимов работы: режим анализа джиттера, режим глазковой диаграммы. Проанализируем глазковую диаграмму исследуемого цифрового сигнала. Для этого перейдем в режим **Eye Mask** нажатием кнопки на передней панели либо кликом мышью в левом верхнем углу по цветной кнопке и выберем режим **Eye/Mask**.

В режиме отображения глазковой диаграммы (рис.6) пользователю предоставлена возможность определить коэффициент затухания (Extinction Ratio), среднюю мощность сигнала, время нарастания и время спада, величину общего джиттера и другие характеристики.

Проанализируем теперь джиттер исследуемого цифрового сигнала. Для этого перейдем в режим **Jitter** нажатием кнопки на передней панели либо одним

corner. When activating the jitter measuring mode, the instrument automatically decompose jitter into components and displays the results in graphical and tabular forms (Fig.7).

In this mode, we can determine the values of different jitter components and, depending on which one is dominant, understand the problem of this digital stream. Thus, it is easy to determine TJ, RJ, DDJ, PJ, DCD and others (Fig.8).

Using BERT N4960A system, it is possible to insert various jitter components at different frequencies and

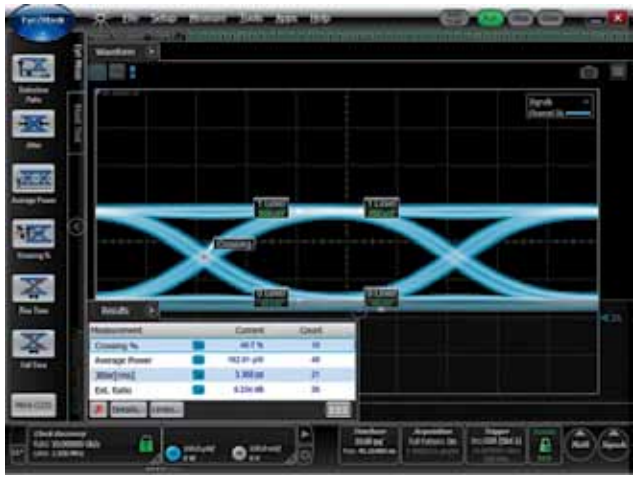


Рис.6. *Анализ глазковой диаграммы цифрового оптического сигнала*
Fig. 6. *Digital optical signal eye diagram Analysis*

Рис.7. *Разложение джиттера сигнала на составляющие и его анализ*
Fig. 7. *Jitter decomposition into components and jitter analysis*

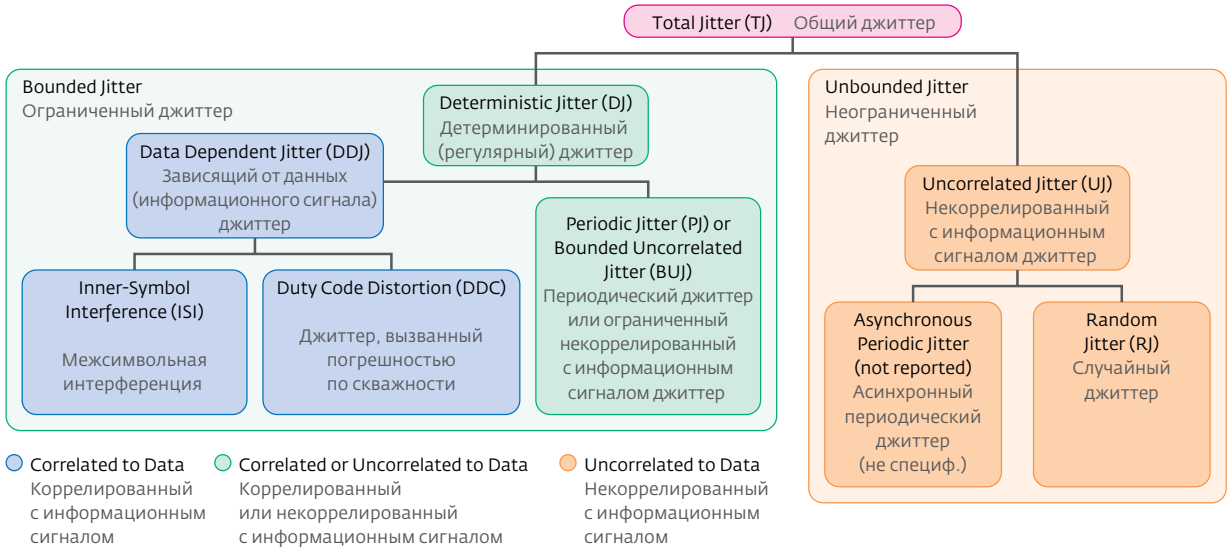


Рис.8. *Обзор различных компонентов джиттера*
Fig. 8. *Review of the various jitter components*

кликом мышью в левом верхнем углу по цветной кнопке выбираем режим **Jitter/Noise**. При активации режима измерения джиттера прибор автоматически проводит разложение джиттера на составляющие и отображает результаты в графическом и табличном виде (рис.7).

В таком режиме мы можем определить значения различных составляющих джиттера и в зависимости от того, какая из них доминирует, понять, в чем проблема данного цифрового потока. Таким образом, легко определить TJ, RJ, DDJ, PJ, DCD и другие (рис.8).

С помощью системы BERT N4960A в генерируемый сигнал можно "подмешивать" различные составляющие джиттера на различных частотах и с различной амплитудой. Таким образом, проводятся "стрессовые" испытания компонент систем передачи данных. "Стрессовые" испытания необходимы для калиброванного ухудшения передаваемого сигнала, которое, в свою очередь, используется для проверки устройства на допускаемый уровень внешних воздействий. Рассматривают три класса составляющих внешнего воздействия ("стресса"):

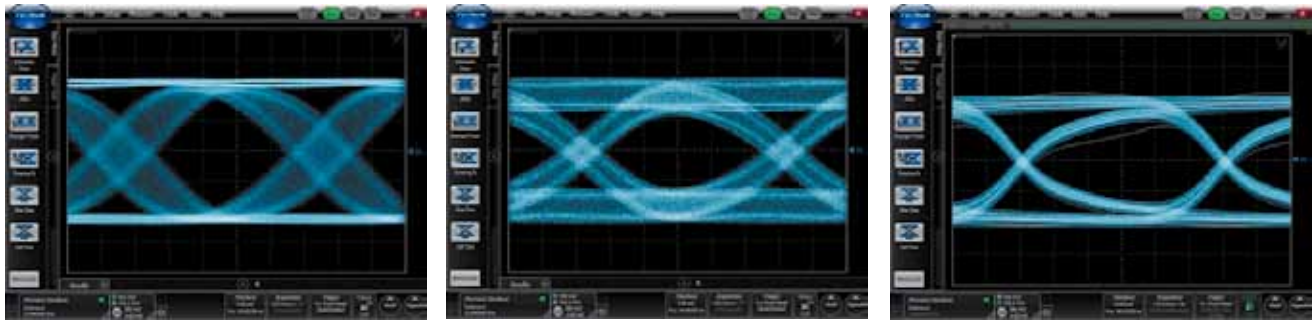
- воздействия на джиттер сигнала (Jitter Stresses) проявляются в виде временных отклонений глазковой диаграммы от идеальной, теоретической (рис.9а). Когда мы смотрим на глазковую диаграмму, мы наблюдаем дрожание сигнала и стремление глазка к закрытию в горизонтальном направлении;
- интерференцию. В данном случае представляет собой амплитудную модуляцию сигнала данных,

with different amplitudes in the generated signal. Thus, "stress" tests of data transmitting-system components are conducted. The "stress" tests are required for a calibrated deterioration of the transmitted signal which, in turn, is used to test the device on the permissible level of external interferences. Three classes of external interferences ("stress") are considered:

- Interference to the jitter signal (Jitter Stresses) is manifested in the form of temporary deviations from the ideal theoretical eye diagram (Fig. 9a). When we look at the eye diagram, we see signal deviations and the eye tending to close in the horizontal direction.
- Interference, representing in this case signal data amplitude modulation, which is observed in the form of a vertically closed eye (Fig. 9b).
- Cross-talk interferences from "aggressors" are a new class of "stress" signals, they cause periodic closing of the eyes (Fig.9c). These "stress" signals are often included in the testing of data transmission line components on their compliance with the standards. When testing, these independent control signals are sent to the end of the communication line and to the alternate line that is to the beginning.

Pay attention to the more blurred signal image in the lower right corner of Figure 10, it occurs due to increased jitter that is due to external interference to the resulting signal jitter.

Thus, the use of the system based on Keysight Infiniium DCA-X 86100D sampling oscilloscope provides us with the following key features:



a) b) c)

Рис.9. *Глазковая диаграмма сигнала после различных типов внешнего воздействия: а) воздействие на джиттер; б) интерференция; в) перекрестные помехи*

Fig. 9. *Signal eye diagram after different types of external effects: a) impact to jitter; b) interference; c) cross-talk*

наблюдается в виде вертикального закрытия глаза (рис.9б);

- перекрестные помехи от "агрессоров" – новый класс "стрессовых" сигналов, вызывают периодическое закрытие глаза (рис.9в). Такие "стрессовые" сигналы часто включаются в испытания компонентов линий передачи информации на их соответствие стандартам. При тестировании эти независимые контрольные сигналы подают в конец линии связи и на альтернативную линию – в начало.

Обратите внимание на изображение более размытого сигнала в правом нижнем углу рисунка 10, оно возникает из-за возросшего джиттера, то есть из-за внешнего воздействия на результирующий джиттер сигнала.

Итак, использование системы на основе стробоскопического осциллографа Keysight Infiniium DCA-X 86100D предоставляет нам следующие ключевые возможности:

- генерация сигнала, подаваемого на приемник, со скоростью до 32 Гбит/с и более (используя мультиплексоры различного конструктивного исполнения;
- "подмешивание" различных составляющих джиттера в сигнал и измерение отклика приемника (закрытие глазка, джиттера и т.д.);
- гибкость по отношению к различным интерфейсам: электрическим и оптическим;
- наиболее точный анализ форм сигналов и глазковой диаграммы;
- автоматическое тестирование на удовлетворение требований по джиттеру (Jitter Tolerance Test).

Таким образом, с помощью представленной измерительной системы можно тестировать приемники различных цифровых стандартов (например, стандарты IEEE 802.3ae Ethernet 10GbE, 8G и 10G Fiber Channel и другие). ■

- generating the signal sent to the receiver at a rate up to 32 Gbit/s or more (using multiplexers of various designs;
- inserting various jitter components in the signal and measuring the receiver's response (eye closure, jitter, etc.);
- flexibility in relation to different interfaces: electrical and optical ones;
- the most accurate analysis of waveforms and eye diagrams;
- automated testing to meet the requirements for jitter (Jitter Tolerance Test).

Thus, using the measuring system, it is possible to test receivers of various digital standards (e.g., IEEE 802.3ae Ethernet 10GbE, 8G and 10G Fiber Channel standards, etc.). ■

Рис.10. *Отображение результатов измерения джиттера после добавления одного из компонентов детерминированного джиттера (DJ)з*

Fig. 10. *Display of the jitter measurement results after inserting one of the components of deterministic jitter (DJ)*